

Таблиця 1 – Результати розрахунків системи з використанням мембран SW30HRLE-400i

<i>Витрати пермеату, $Q_p, \text{м}^3/\text{год}$</i>	<i>Концентрація вихідного потоку, $C_f, \text{г/л}$</i>	<i>Обмеження на концентрацію пермеату, $C_p, \text{г/л}$</i>	<i>Уточнена концентрація пермеату, $C_p, \text{мг/л}$</i>	<i>Кількість мембранних елементів</i>
200	10	< 80	77.79	122
200	12	< 100	93.96	98
200	15	< 130	121.45	102

Для розв'язання задачі був використаний метод генетичних алгоритмів [3]. Приклад результатів розрахунків для системи з продуктивністю по пермеату 200 м³/год при використанні морської води з загальним солевмістом 10–15 г/дм³ наведений в табл. 1. Отримані результати показали, що собівартість системи можна зменшити більш ніж на 10%, порівняно з аналогічною існуючою установкою, що свідчить про ефективність застосування даного методу.

1. Kimura S. Analysis of data in reverse osmosis with porous cellulose acetate membranes used / S. Kimura, S. Sourirajan // AIChE J. – 1967. – Vol. 13 – p. 497–503.
2. FILMTEC Reverse osmosis membranes: Technical Manual; Dow Liquid Separations – 2004. – 179 с.
3. Guria C., Bhattacharya K., Gupta K. Multi-objective optimization of reverse osmosis desalination units using genetic algorithm. Computers and Chemical Engineering 29 – 2005 – 14 с.

ОПТИМІЗАЦІЯ ОПРІСНЕННЯ МОРСЬКОЇ ВОДИ МЕТОДОМ ЗВОРОТНОГО ОСМОСУ З ПОВТОРНИМ ВИКОРИСТАННЯМ МІСЬКИХ СТІЧНИХ ВОД

Малецький З.В., Мітченко Т.Є., Квітка О.О.

Національний технічний університет України «КПІ», mail@zahar.info

Нестача питної води є одним із чинників, які викликають нестійкість людського розвитку. Вона посилюється із зростанням населення і, відповідно до прогнозів ООН та ВООЗ, ситуація не стане стабільною без застосування цілеспрямованих дій [1]. Враховуючи, що 96,5% світових запасів води знаходяться в морях і океанах з загальним солевмістом (ЗСВ) 30–45 г/л, проблема отримання прісної води з морської є вкрай актуальною. На цьому тлі мембранні технології опріснення морської і солонуватої води викликають величезний інтерес, особливо в посушливих прибережних зонах. Але високе споживання енергії залишається основним недоліком технології зворотного осмосу (ЗО) і сильно впливає на ціну опрісненої води.

На даний час для знесолення морської води широкого розповсюдження набули зворотньоосмотичні технології, засновані на застосуванні мембран низької проникності типу SW (SWRO) і насосів високого тиску з рекуперацією енергії [2], які забезпечують можливість зниження мінералізації морської води з вихідним ЗСВ ~ 40 г/дм³ до значень ~ 100 – 500 мг/дм³ в одну стадію. З економічної точки зору найбільш вразливим місцем такої технології є велика витрата електроенергії, в основному споживаної насосами високого тиску, а також значні капітальні та експлуатаційні витрати, зумовлені високою вартістю мембран типу SW. Як було показано раніше [3], використання для знесолення морської води, змішаної з міськими стічними водами меншого ЗСВ, мембранних елементів (МЕ) високої і середньої проникності (BW, LE, NF), замість традиційних SW, дозволяє суттєво знизити собівартість пермеату.

В даній роботі розглянуто розв'язання вказаної задачі на прикладі опріснення води Середземного моря (ЗСВ 37 г/л), розбавленої в різних співвідношеннях міськими стічними

водами міста Монастір, Туніс (ЗСВ 8 г/л). При оптимізації двохстадійної системи мембранної демінералізації (СМД) морської води (рис. 1) продуктивністю 200 м³/ч було розглянуто різні типи МЕ фірми Filmtec (Dow Chemical), одно та двоступінчате розміщення стадій з різним числом секцій, а також періодичний і безперервний процеси. Кожна стадія СМД складається з певної кількості МЕ, розміщених в спеціальних мембранотримачах (МТ). Кожний МТ може мати до 8 МЕ, поєднаних послідовно по концентрату. При цьому МТ між собою підключаються паралельно.

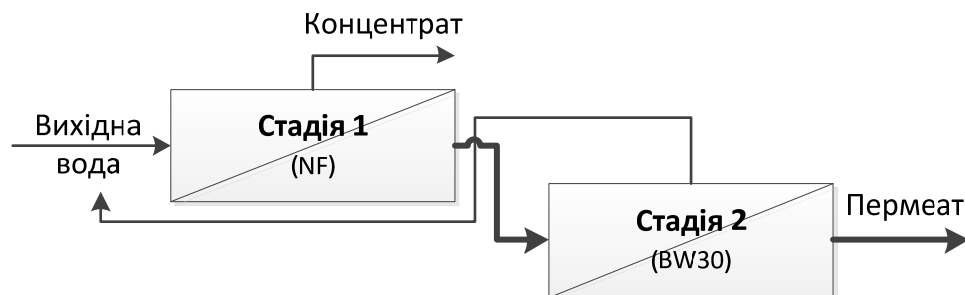


Рис. 1 – Приклад компоновки двохстадійної СМД морської води з використанням елементів високої і середньої проникності.

Розрахунки проводилися на основі комплексної фізико-статистичної моделі МЕ [4], яка була перевірена експериментально на основі одного елементу мембранної системи. Отримані результати підтверджені розрахунками за допомогою програми системного аналізу зворотного осмосу (ROSA, Dow Chemical).

В загальному вигляді, задачу оптимізації можна сформулювати наступним чином: для заданих характеристик вхідного потоку та характеристик МЕ, які використовуються на кожній стадії СМД, необхідно знайти таку структуру системи (кількість МЕ, кількість МТ і підстадій, їх компоновку), щоб характеристики потоку пермеата на виході відповідали заданим вимогам, а застосування отриманої структури на практиці дозволило звести виробничі витрати до мінімуму:

$$\min Z = \sum_{i=1}^N (n_i(Q_f) \cdot m_s \cdot c_{el} + E_i(Q_f) \cdot c_e + n_i(Q_f) \cdot m_i \cdot S_e \cdot c_{oe}) \quad (1)$$

При обмеженнях:

$$\begin{cases} 1 \leq m_i \leq 8 \\ \frac{C_{fc} \cdot B \cdot pf \cdot S_e \cdot \rho}{Q} \leq C_{pmax} \\ Q_p \cdot \frac{Y_i(m_i)}{100\%} = Q \\ i = 1, \dots, N \end{cases} \quad (2)$$

де n_i – кількість паралельно з'єднаних МТ у стадії; Q_f , Q_p , Q_c – витрати вхідної води, пермеату та концентрату, відповідно, м³/год; C_p , C_{fc} – концентрації розчинених речовин у пермеаті та у приповерхневому шарі мембрани, відповідно, мг/дм³; c_{el} – приведена вартість МЕ, \$/рік; c_e – вартість електроенергії, \$/кВт; c_{oe} – вартість обслуговування мембран, \$/м²; pf – коефіцієнт концентраційної поляризації; Y_i – показник конверсії для i -ої підстадії, %; $E_i(Q_f)$ – кількість електроенергії, що витрачається на одиницю об'єму кінцевого продукту, кВт·год/м³; S_e – ефективна площа мембранного елемента, м²; B – проникність солей через мембрану, кг/м²·с; ρ – густина розчинника, кг/м³.

Для розв'язання задачі оптимізації застосовано модифікований алгоритм, який передбачає уточнення оптимуму, знайденого за допомогою генетичного алгоритму, методом градієнтного пошуку [4]. Запропонований алгоритм оптимізації на базі моделі двохстадійної СМД морської води було реалізовано у вигляді програмного продукту в середовищі MATLAB.

Отримані результати показали, що зменшення солоності вихідної води шляхом попереднього змішування міських стічних вод з морською водою в межах 30-50%, забезпечує можливість використання МЕ з високою і середньою проникністю і суттєво зменшує енерговитратність СМД. Показано, що двостадійна СМД, побудована з вказаних МЕ, є найкращим рішенням з економічної точки зору і дозволяє зменшити витрати на 37-70%.

Запропонований підхід забезпечує втілення принципів сталого розвитку як з точки зору економії енергоресурсів, так і з точки зору ефективної утилізації міських стічних вод. Цей підхід вносить вклад у сталий розвиток, пропонуючи новий спосіб економії енергії в мембранній технології для опріснення води, роблячи опріснену воду доступною в критично важливих галузях.

1. <http://www.un.org/russian/millenniumgoals/envIRON.shtml>
2. *Richard L. Stover*. Energy recovery devices for seawater reverse osmosis. ERI Technology office, November 2006
3. *Fendri F., Mitchenko T., Maletskyi Z.* Varying seawater salinity as optimization factor in water demineralization and efficient way of municipal waste water utilization. Proceedings of IWA Regional Conference and Exhibition on Membrane Technology and Water Reuse, Istanbul, Turkey, 18-22 October 2010, p.684-687; *Fendri F., Mitchenko T., Maletskyi Z.* Optimization of the reverse osmosis seawater de-mineralization technologies for a power producing industry. *Desalination and Water Treatment*, 25 (2011), p. 84–90.
4. *Шоботов С.С, Квитка А.А, Фендри Ф.* Математическое моделирование процесса обратноосмотической деминерализации воды Восточно-европейский журнал передовых технологий, 2010, 2/10 (44), с. 55–58.